

**П. Д. Долженко\*, М. С. Тихонова, А. Н. Беляков, Р. О. Кайбышев**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
г. Белгород

\*dolzhenko.p@yandex.ru

## ПЕРСПЕКТИВНАЯ АУСТЕНИТНАЯ ХЛАДОСТОЙКАЯ СТАЛЬ: СТРУКТУРА И СВОЙСТВА

В работе представлены исследования новой перспективной аустенитной хладостойкой стали Fe–0,025 % C–22 % Cr–10,2 % Ni–0,36 % N–6,2 % Mn–0,34 % Si–1,9 % Mo–0,003 % S–0,005 % P (вес. %). Оценены механические свойства, а именно, предел текучести, предел прочности, удлинение до разрушения, ударная вязкость при пониженных температурах от 20 °C до минус 196 °C.

*Ключевые слова:* аустенитная хладостойкая сталь, прочность, пластичность, ударная вязкость.

**P. D. Dolzhenko, M. S. Tikhonova, A. N. Belyakov, R. O. Kajbyshev**

## ADVANCED AUSTENITIC CRYOGENIC STEEL: STRUCTURE AND PROPERTIES

A new advanced austenitic cold-resistant steel, 0.025 % C–22 % Cr 10.2 % Ni–0.36 % N–6.2 % Mn–0.34 % Si–1.9 % Mo–0.003 % S–0.005 % P and the balance Fe (all in weight%), was investigated. The mechanical behavior of austenitic cold-resistant steel was studied by tension and Charpy impact tests in the temperature range of 20 °C to –196 °C.

*Keywords:* austenitic steel, cold resistance, strength, ductility, impact toughness.

В настоящее время для освоения Арктического шельфа растет необходимость в исследованиях и разработках новых конструкционных материалов, которые могли бы использоваться при пониженных температурах. Одним из перспективных в этом отношении материалов являются аустенитные нержавеющие стали, которые демонстрируют высокую коррозионную стойкость и высокую ударную вязкость даже при криогенных температурах. Однако существует недостаток, связанный с низким пределом текучести. Эта проблема может быть решена за счет легирования стали азотом, участвующим в твердорастворном упрочнении.

В качестве объекта исследования была выбрана аустенитная коррозионностойкая сталь Fe–0,025 % C–22 % Cr–10,2 % Ni–0,36 % N–6,2 % Mn–0,34 % Si–1,9 % Mo–0,003 % S–0,005 % P (вес. %),

химический состав которой разработан лабораторией механических свойств наноструктурных и жаропрочных материалов НИУ «БелГУ». Сталь 03X22H10AG6M2 подвергалась отжигу при температуре 1100 °С в течение 1 часа и последующей прокатке при 1100 °С.

Исследования структуры проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Nova Nano SEM 450, оснащенного анализатором картин дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD). Размер шага сканирования составлял 0,4 мкм. Изображения были подвергнуты процедуре очистки с минимальным индексом достоверности 0,1. Значения ударной вязкости определяли с использованием копра Instron SL-1M в диапазоне температур от 20 °С до минус 196 °С. Испытания на растяжение проводили в диапазоне температур от 20 °С до минус 196 °С со скоростью деформации  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$  с использованием разрывной машины Instron 5882.

Полученная микроструктура состоит из равноосных аустенитных зерен (рис.1) со средним размером 15 мкм, плотность дислокаций составляет  $8 \times 10^{13} \text{ м}^{-2}$ . Доля большеугловых границ в такой структуре составляет 0,97, из них доля специальных границ или границ двойникового типа  $\Sigma 3^n$  равна 0,42.

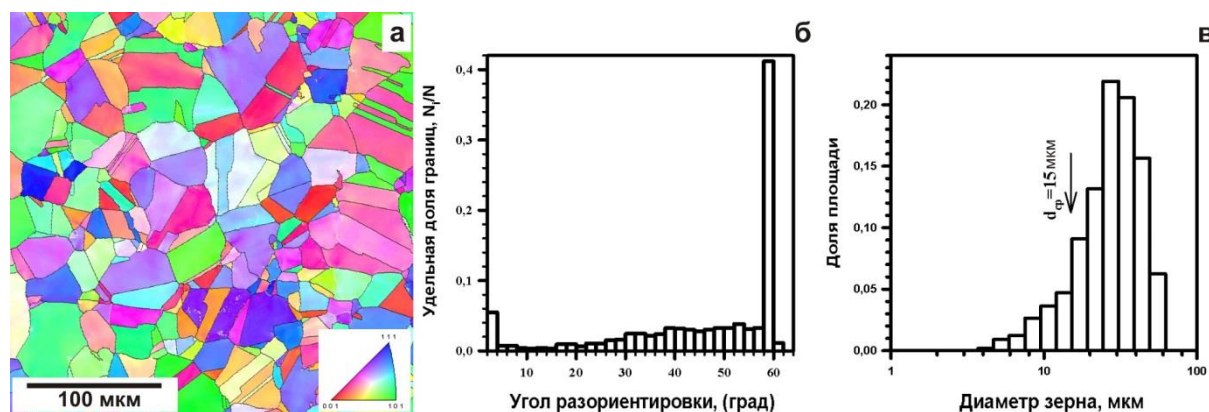


Рис. 1. Микроструктура стали 03X22H10AG6M2: *а* – картина дифракции обратно-рассеянных электронов, черным цветом показаны границы с углом разориентировки более 15 градусов, белым цветом указаны углы с разориентировкой от 2 до 15 градусов; *б* – распределение границ зерен по углам разориентировки; *в* – распределение зерен по размерам

Понижение температуры испытания сопровождается повышением прочностных характеристик стали (рис. 2).

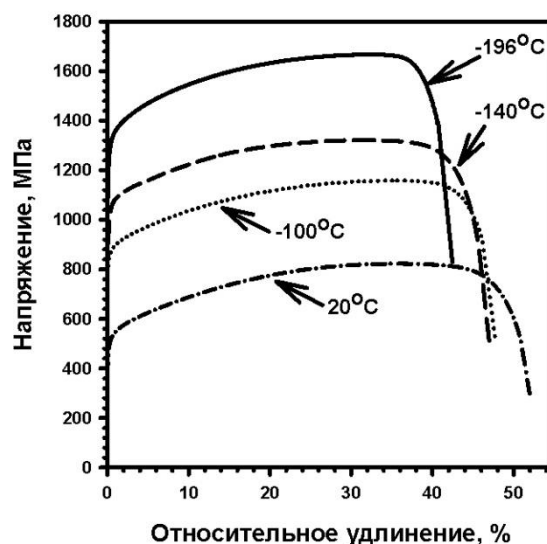


Рис. 2. Зависимости напряжение – относительное удлинение, полученные в результате испытаний на растяжения стали 03X22H10AG6M2 при различных температурах

При этом изменение характеристик пластичности (относительная деформация) происходит плавно, что свидетельствует как об однородности структуры во всем объеме, так и о высоком запасе пластичности при пониженных температурах. Результаты испытаний на растяжение стали 03X22H10AG6M2 представлены в таблице.

Механические свойства стали 03X22H10AG6M2

Температура испытания, °C	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
20	820	500	52
-100	1160	820	46
-140	1320	910	45
-196	1670	1240	41

В диапазоне температур от комнатной до температуры жидкого азота наблюдается двукратное повышение прочностных характеристик при незначительном снижении характеристик пластичности. Также были проведены исследования ударной вязкости образцов стали 03X22H10AG6M2 в широком диапазоне температур. На рис. 3 представлена диаграмма ударного разрушения в координатах нагрузка  $F$  – прогиб  $S$ .

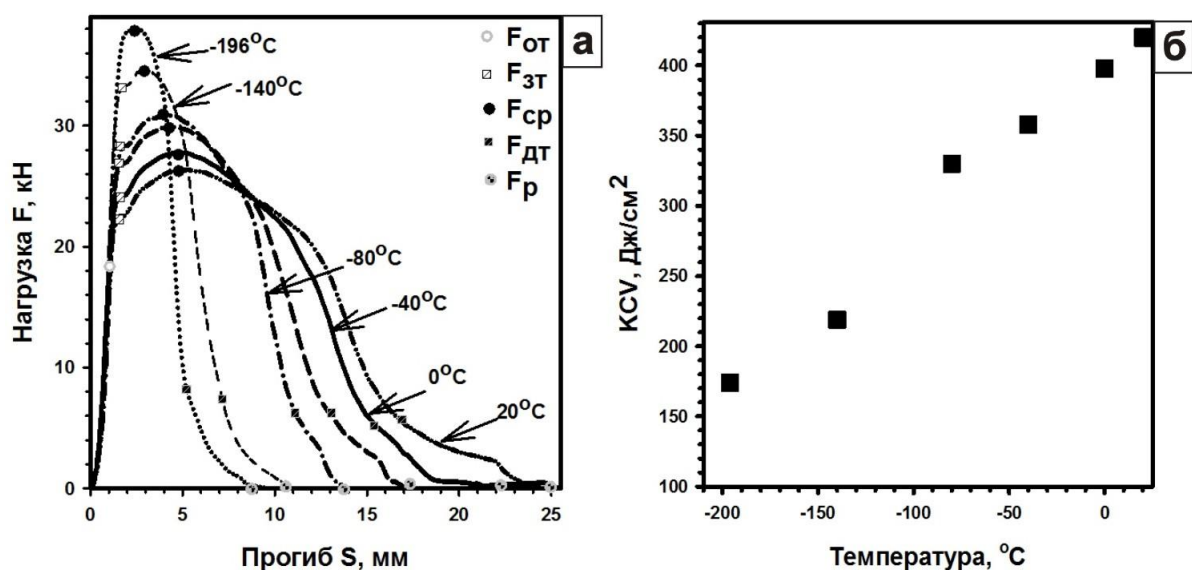


Рис. 3. *а* – диаграмма нагрузка  $F$  – прогиб  $S$  при ударном деформировании образца Шарпи; *б* – ударная вязкость стали 03X22H10AG6M2 при различных температурах испытания

На диаграммах ударного разрушения (рис. 3, *а*) выделены характерные точки:  $F_{от}$  – начало общей текучести;  $F_{зт}$  – начало пластической деформации;  $F_{ср}$  – зарождение трещины;  $F_{дт}$  – затупление трещины при доломе;  $F_{р}$  – разрушение образца.

Полагаем, что до точки  $F_{от}$  происходит упругопластический изгиб образца, трещина еще не начала формироваться. Из диаграммы на рис. 3 следует, что тангенс угла наклона кривых не зависит от температуры испытания. Кривая на участке  $F_{от} - F_{зт}$  повышается с уменьшением температуры испытания, так как для начала пластической деформации необходимы более высокие напряжения. На участке  $F_{зт} - F_{ср}$  видим рост нагрузки, происходит накопление дефектов для зарождения трещины. С понижением температуры испытания  $F_{ср}$  активно увеличивается и смещается в сторону меньшего значения прогиба  $S$ . Участок  $F_{ср} - F_{дт}$  характеризуется релаксацией напряжений за счет третинообразования в результате распространения трещины. На стадии  $F_{дт} - F_{р}$  появляется биение кривой, что свидетельствует о вязкой составляющей разрушения образца при доломе. Характерное биение проявляется во всем температурном интервале. Даже при минус 196 °С материал демонстрирует вязкое разрушение. Отличительной особенностью разрушения при минус 196 °С является то, что практически отсутствует либо очень мала область  $F_{зт}$ . После стадии упругопластического изгиба материал при минус 196 °С быстро накапливает напряжения, необходимые для зарождения трещины, на диаграмме наблюдается максимум нагрузки, после чего происходит релаксация напряжений в процессе движения трещины. Значения ударной вязкости при различных температурах

представлены на рис. 3, б. В интервале температур от 20 °С до минус 196 °С ударная вязкость изменяется с 420 Дж/см<sup>2</sup> до 173 Дж/см<sup>2</sup>, сохраняясь на достаточно высоком уровне, и излом образца характеризуется вязким разрушением.

Таким образом, разработанная хладостойкая аустенитная сталь обладает уникальным сочетанием высоких прочностных характеристик и ударной вязкости при пониженных температурах, предел прочности при минус 196 °С составляет 1670 МПа, предел текучести – 1240 МПа, пластичность – 41%, а ударная вязкость – 173 Дж/см<sup>2</sup>, что позволяет рассматривать сталь 03Х22Н10АГ6М2 в качестве конструкционного материала, работающего при отрицательных температурах вплоть до криогенных температур.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки России проекта № 14.575.21.0070 (ID No. RFMEFI57514X0070).*